

Экспериментальные исследования эхо- сигналов с большими задержками радиоволн СВ диапазона

А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров, Н.А. Степанов, А.О. Мингалева, Г.А. Загорский

Эхо-сигналы с большими задержками

Long Delayed Echo (LDE)

Первое упоминания о регистрации данного эффекта было почти 100 лет назад – в 1927 г.

- *Stormer C. Short wave echoes and the aurora borealis // Nature. V. 122. N. 3079, P. 878. 1928.*
Сообщается о регистрации нескольких эхо-сигналов на частоте 9,55 МГц от передатчика в Эйтховене, Голландия. Сигнал был зарегистрирован Дж. Хальсом в окрестности Осло с запаздыванием примерно 3 секунды.
- *Taylor Hoyt A., Young L. C. Studies of high-frequency radio wave propagation // Proc. Inst. Radio Eng., V. 16 N. 5, P. 561 – 578. 1928.*
Приведены результаты регистрации эхо-сигналов на трассе Роки-Пойнт – Вашингтона (США), протяженностью 420 км. Излучение регистрировалось на дискретных частотах в диапазоне от 13 до 21 МГц. Помимо прямых сигналов, распространяющихся по дуге большого круга, были зарегистрированы сигналы с задержками, соответствующими распространению на трассах протяженностью от 2500 до 10000 км.

Эхо-сигналы с большими задержками в СВ и КВ -диапазоне

Long Delayed Echo (LDE)

Ellis G.R. Goldstone G.T. The probability of observing ducted magnetospheric echoes from the ground. // J. Geophys. Res. V. 95 N. 5. P. 6587-6590. 1990.

Частота излучения 1910 кГц
Мощность излучения 17 кВт

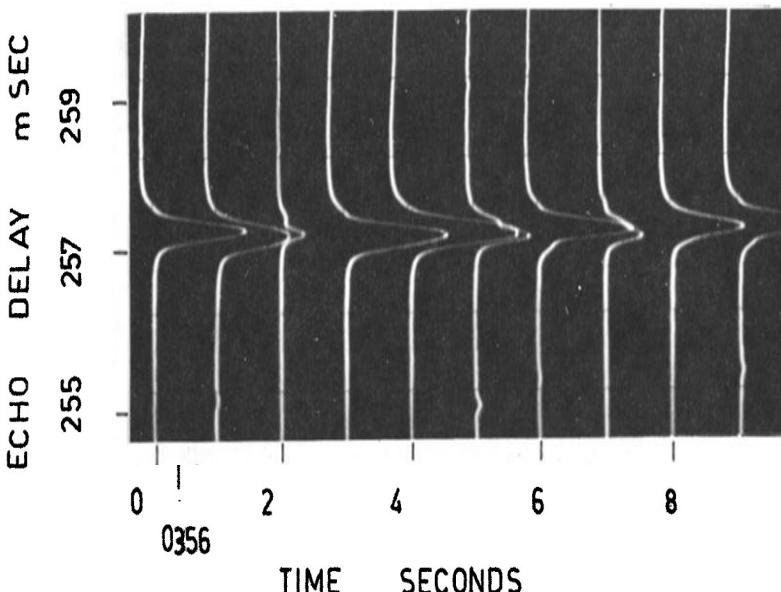
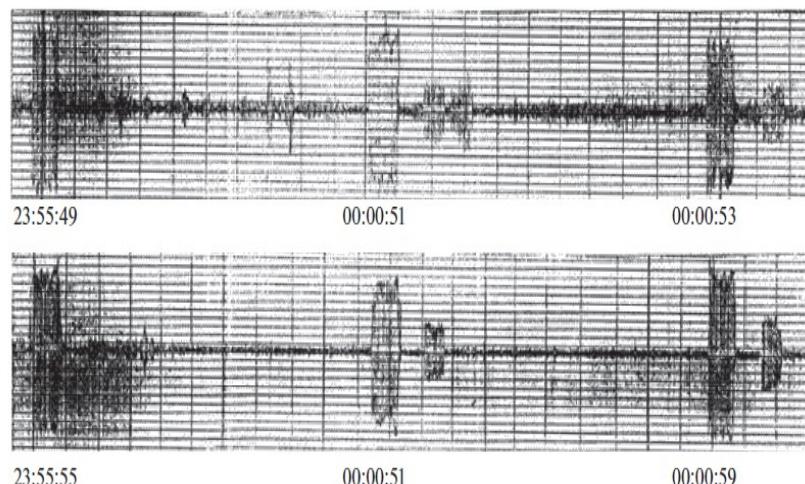


Fig. 2. Record of echoes on August 26, 1987, obtained with the 2.5-m loop antenna. The echoes show the Gaussian shape of the $150 \mu\text{s}$ transmitter pulse.

Благовещенский Д.В., Добросельский К.А., Мальцева О.А. О диагностических возможностях эхо-сигналов средневолнового диапазона. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. №5. С. 75-81. 1996.

Частота излучения 1800 кГц
Мощность излучения 5 кВт



Muldrew D.B. Radio propagation along magnetic field-aligned sheets of ionization observed by the ALOUETTE topside sounder. // J. Geophys. Res. V. 68. P. 5355-5370. 1963.

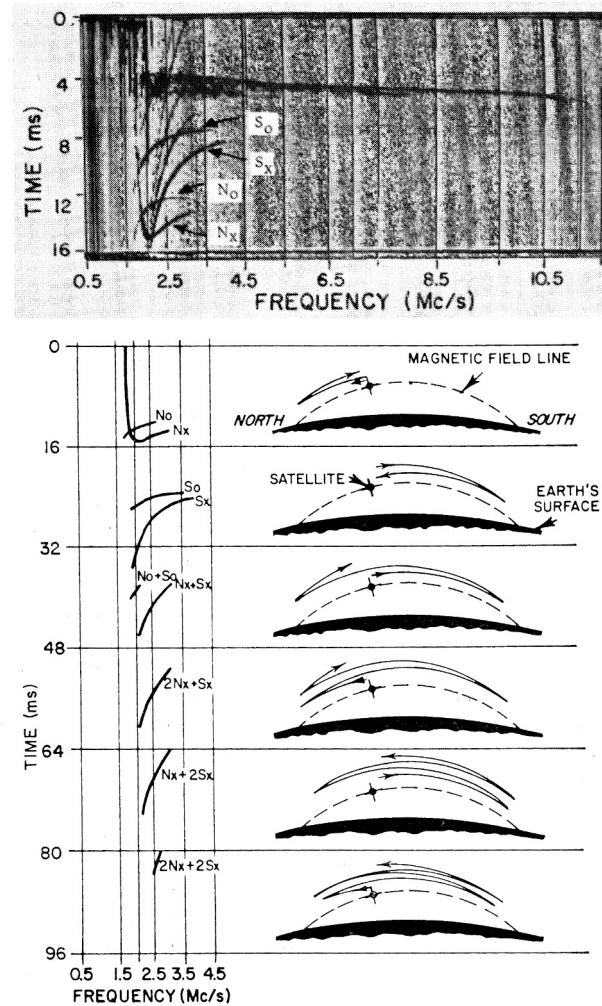


FIG. 1. After Muldrew (1963). An Alouette I ionogram recorded at 1725 U.T. on December 18, 1962. The propagation paths of the various conjugate echoes are illustrated.

Гидирование радиосигналов

гидирование - волноводное распространение электромагнитных волн вдоль силовых линий магнитного поля

Радиоволна, пройдя ионосферу, проникает в магнитосферу и канализируется вдоль магнитных силовых линий Земли до магнитосопряженной точки (MCP), отражается от внешней ионосферы и возвращаются обратно.

Выполнена серия экспериментов в январе 2024 и 2025 гг

Цель:

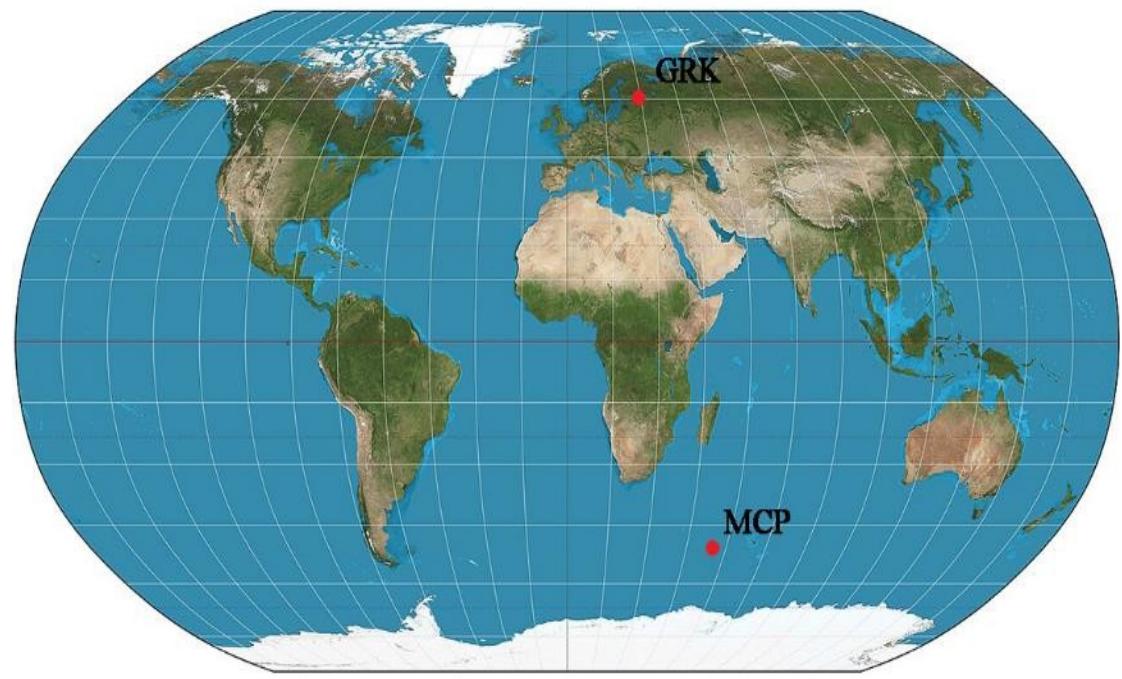
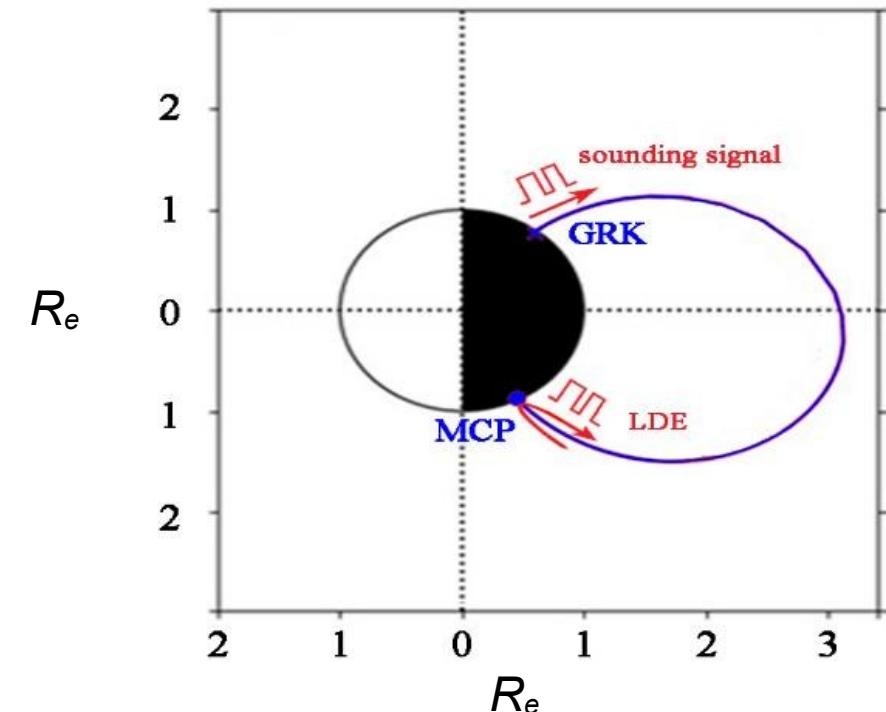
- ✓ регистрация эхо-радиосигналов с длительностью задержек сотни миллисекунд и более
- ✓ анализ фоновых геофизических условий обеспечивающих эффект гидирования.

Положение МСТ 51° ю.ш. и 53° в.д.

значение L-оболочки 3,4 – 3,5.

Расчетное расстояние до магнитосопряженной точки и обратно вдоль силовой линии составляет 94546 – 96712 км,

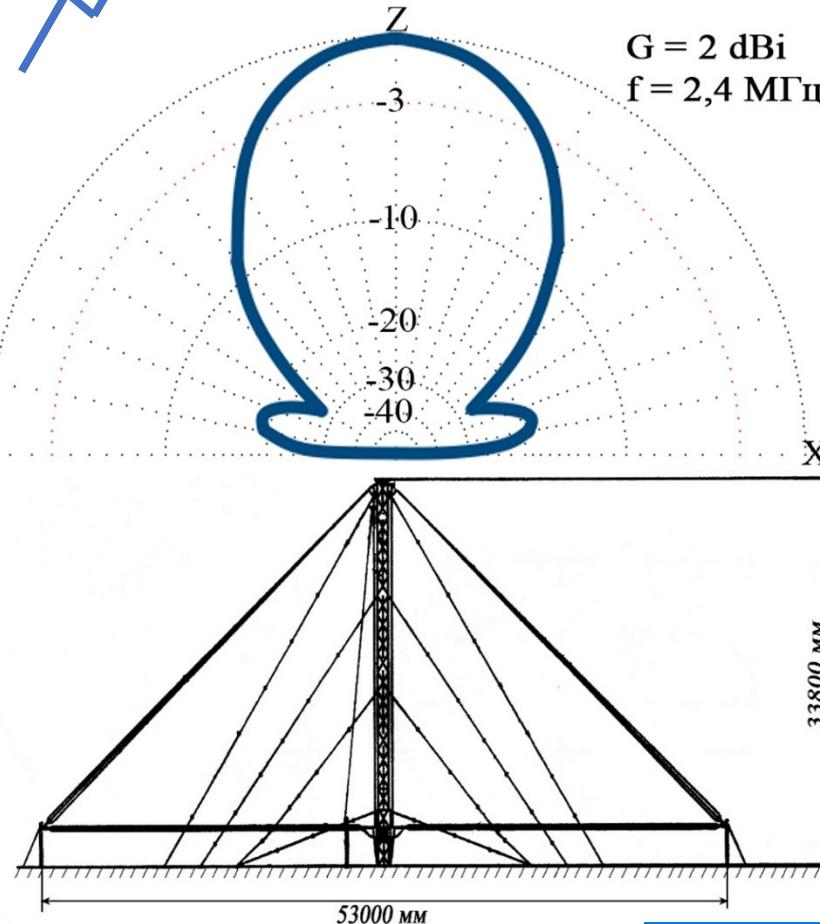
время задержки эхо-сигналов должно находиться в диапазоне 310 – 322 мс.



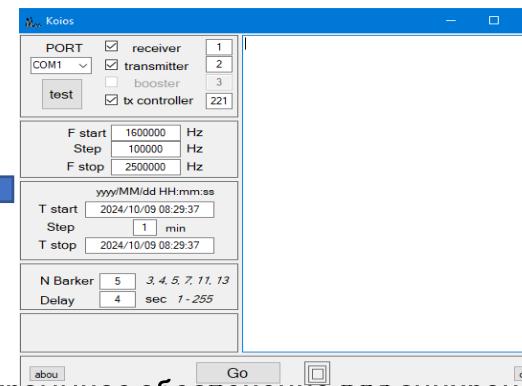
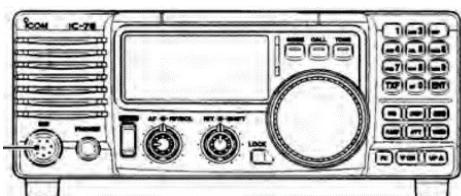
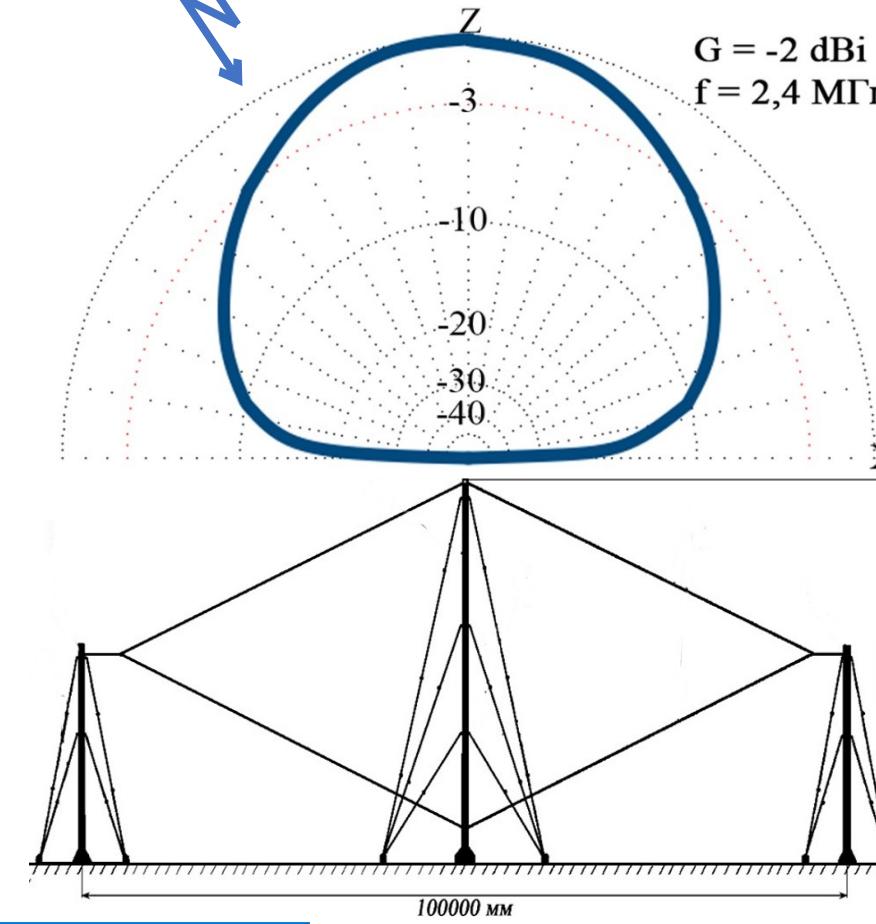
Постановка эксперимента

Оборудование

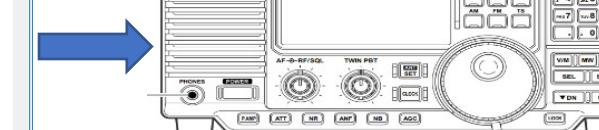
Передающая часть



Приемная часть



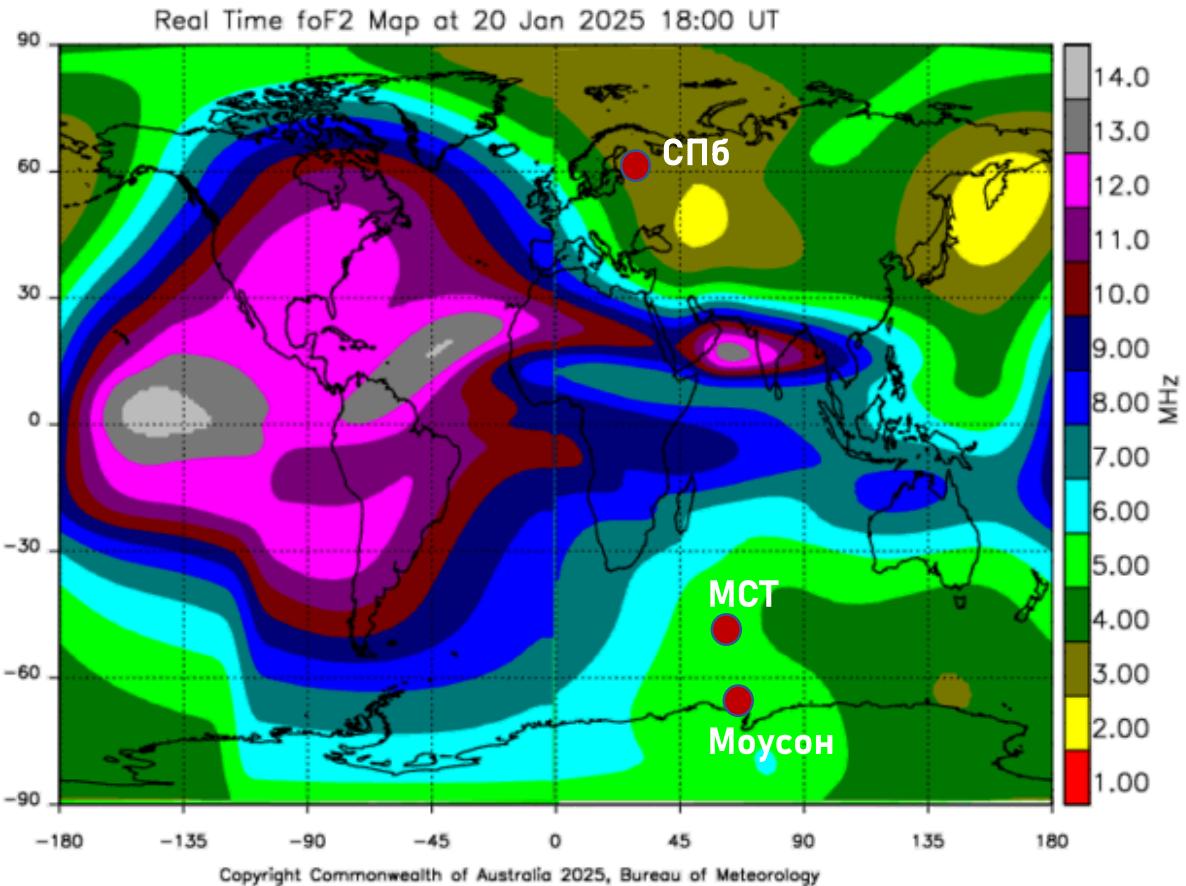
Программное обеспечение для синхронизации приемника и передатчика



1. Программное обеспечение для формирования сигналов зондирования и синхронизации передатчика с приемником.
2. Трансивер IC-718 и усилитель PW-1
3. Приемник IC-R75, ПО обеспечивающее регистрацию сигналов их визуализацию и анализ в реальном времени.

Постановка эксперимента

Фоновая обстановка



- Ионозонд ВЗ на НИС «Горьковская»
- Australian Space Weather Forecasting Centre
- Space Weather Prediction Center NOAA

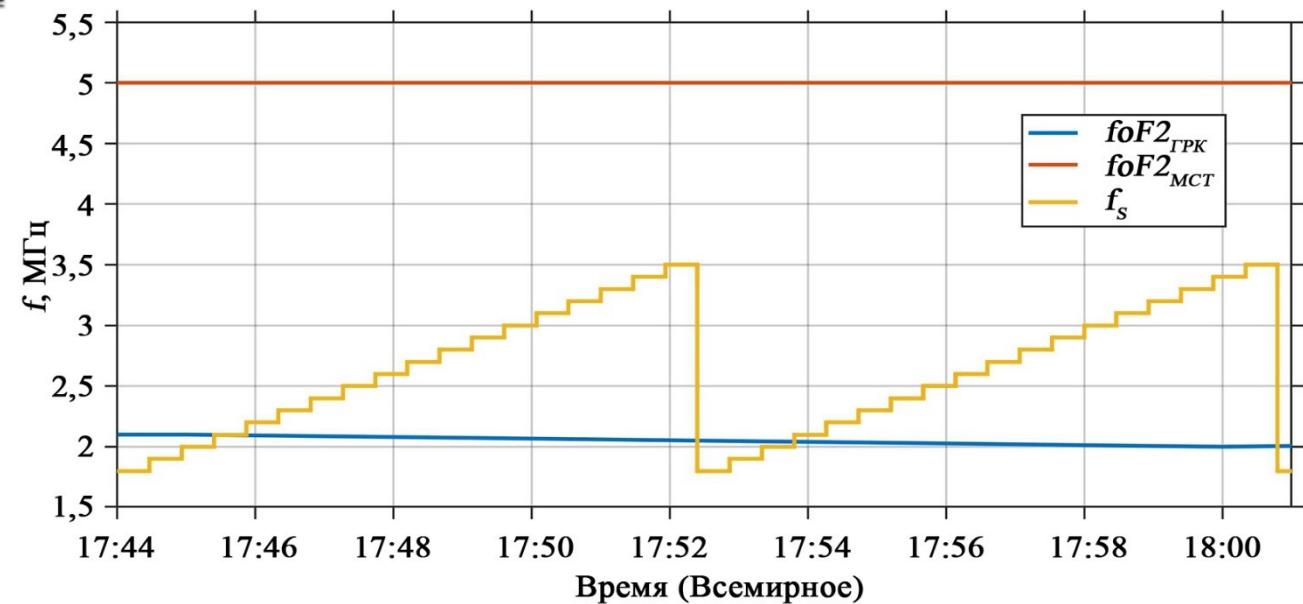
Условия

критическая частота в пункте излучения – НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) должна быть ниже, чем в магнитосопряженной точке ($foF2_{MCP}$)

$$foF2_{GRK} < foF2_{MCP}$$

частота зондирующих сигналов f_s должна соответствовать условию

$$foF2_{GRK} < f_s < foF2_{MCP}$$

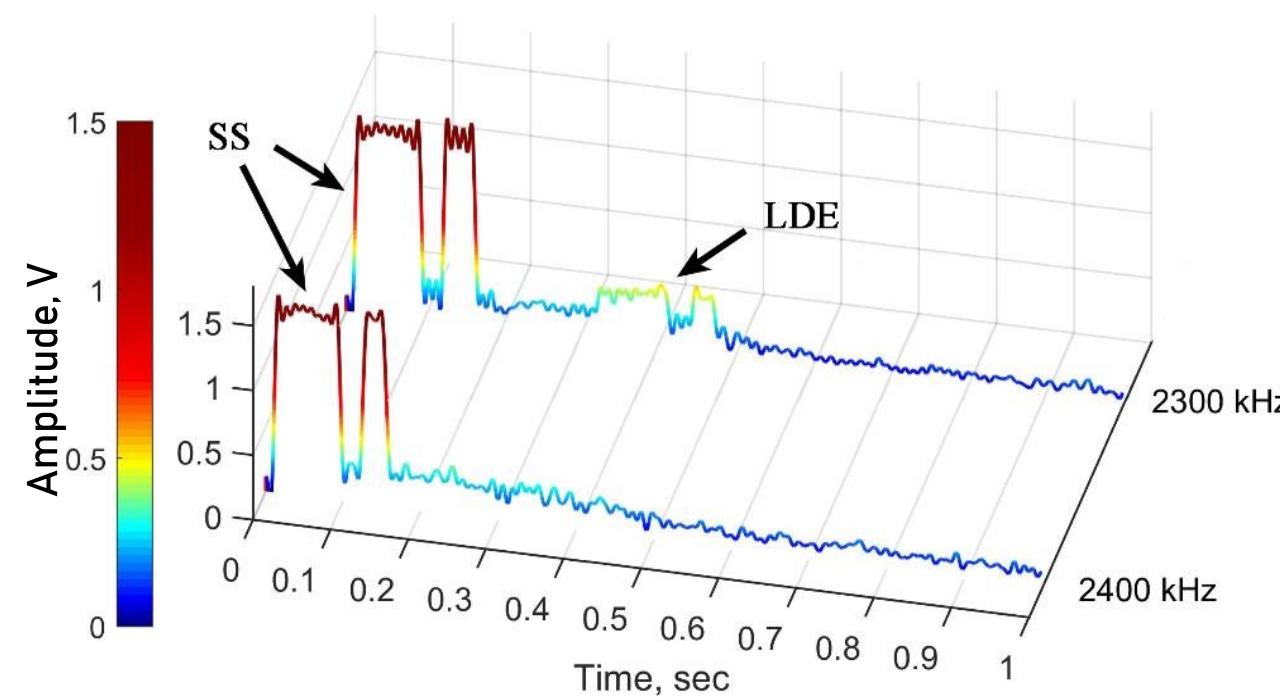


Ход критических частот F2-слоя ионосферы на НИС «Горьковская» и магнитосопряженной точке, изменение частоты зондирующего сигнала 20 января 2025г с 17:30 до 18:30 UT.

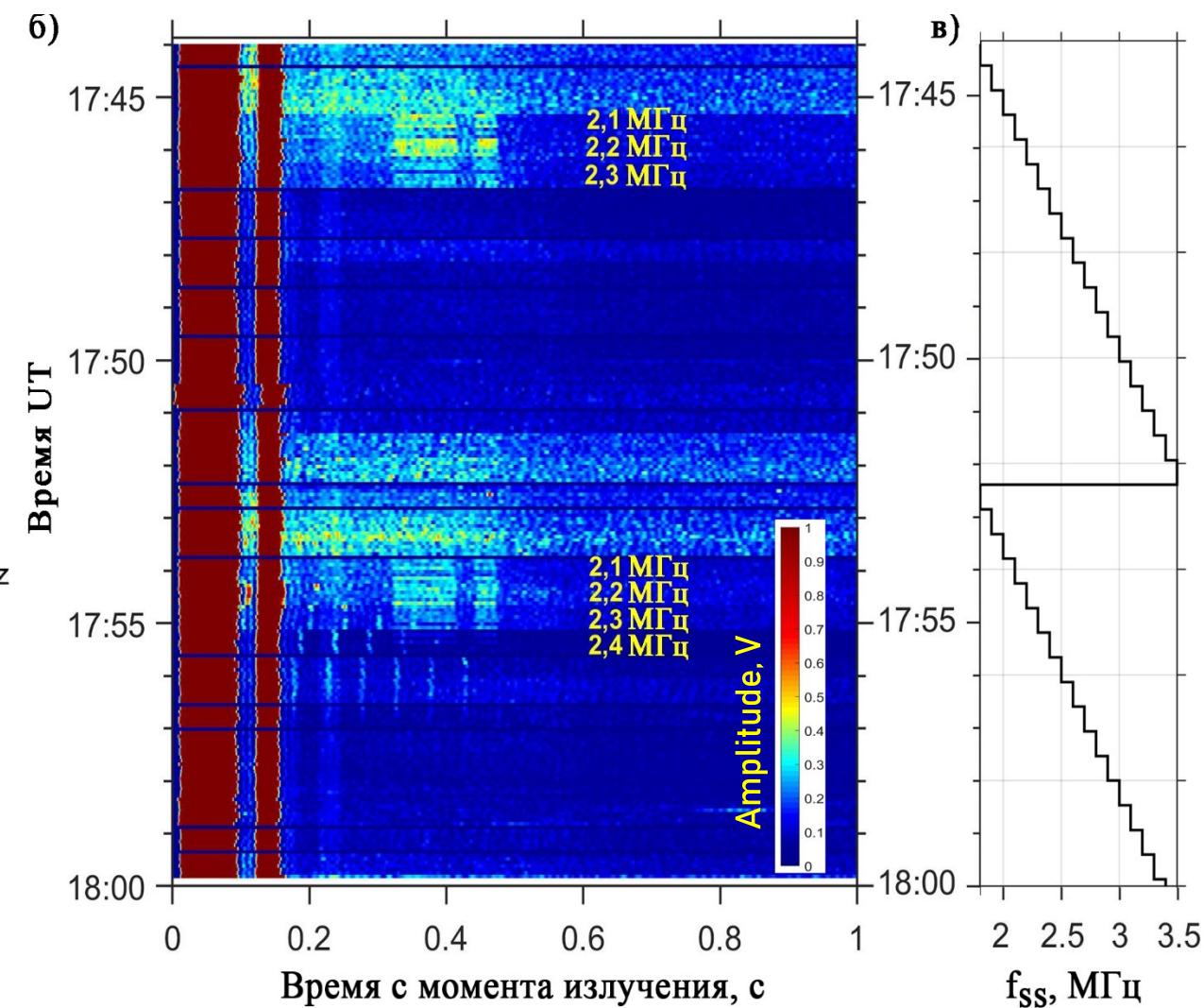
Результаты эксперимента

20 января 2025 г 17:44 – 18:00 UT

Излучение зондирующих сигналов выполнялось в диапазоне 1,8 – 3,5 МГц, с шагом 100 кГц. На каждой частоте излучалось 7 импульсных последовательностей с интервалом 4 с. Мощность излучения составляла 1 кВт.

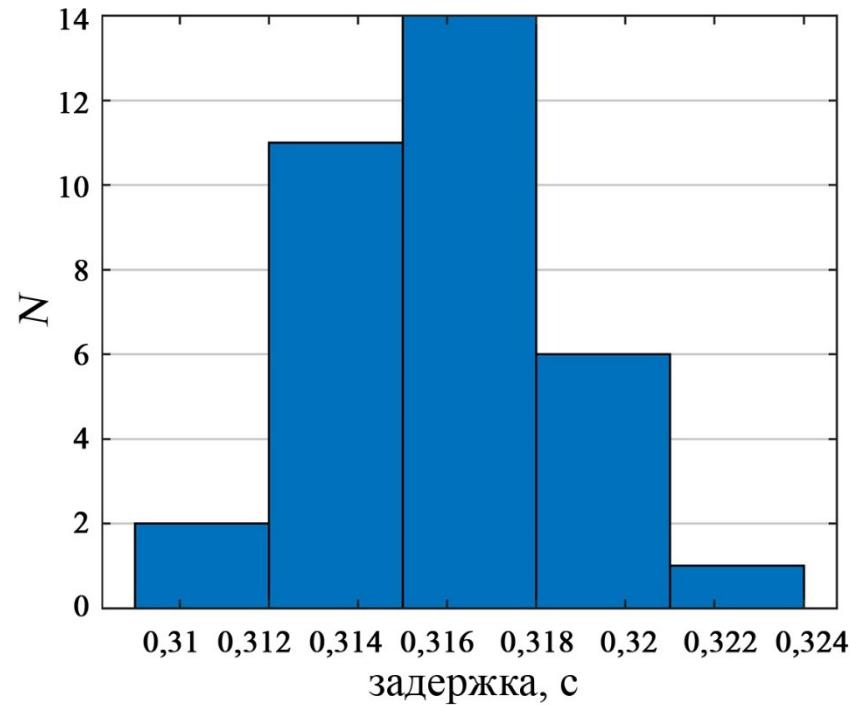


Интенсивности зарегистрированных сигналов и значение частоты зондирования



Результаты эксперимента

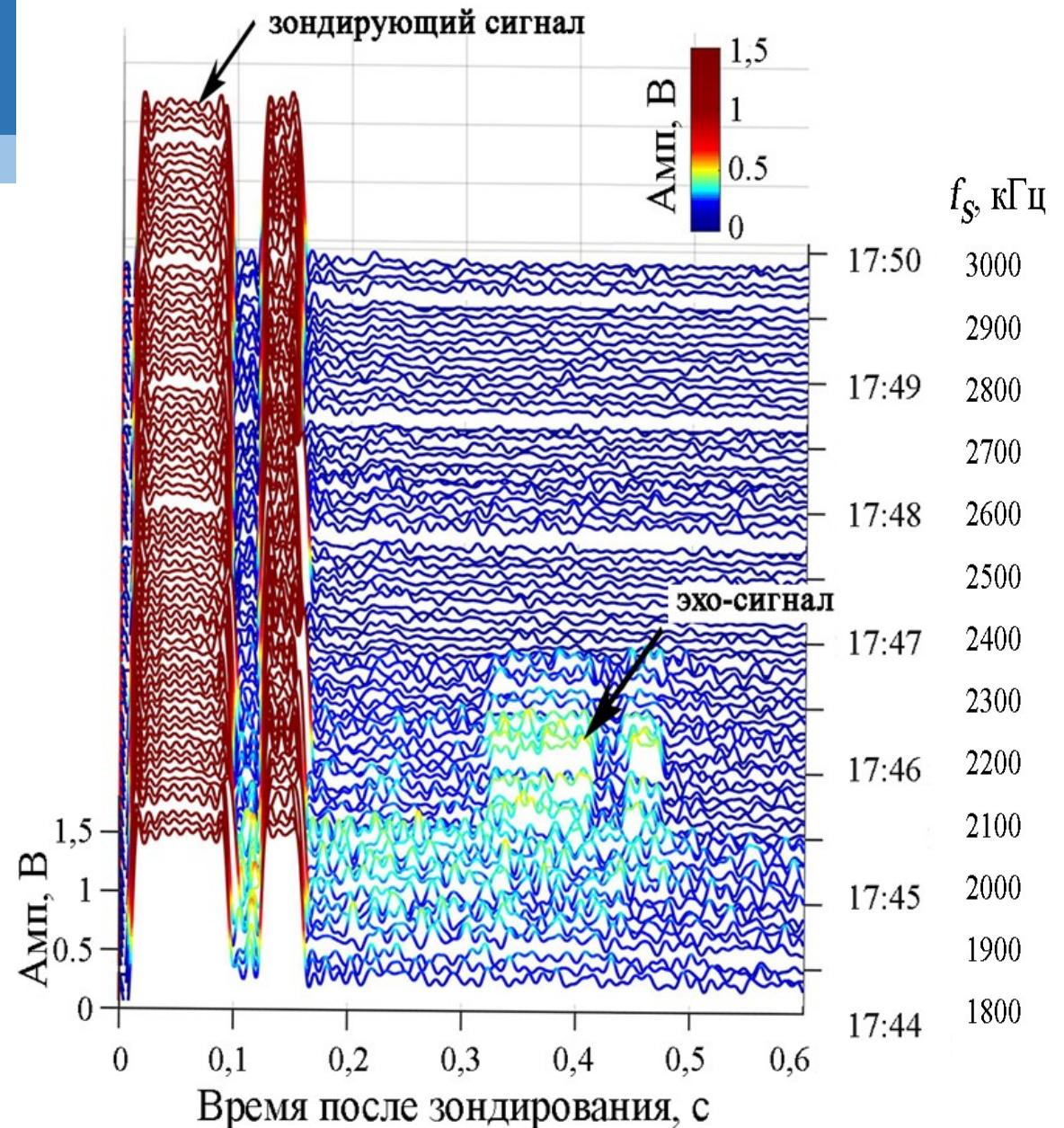
20 января 2025 г 17:44 – 18:00 UT



Всего было зарегистрировано **38 радиоэхо**.

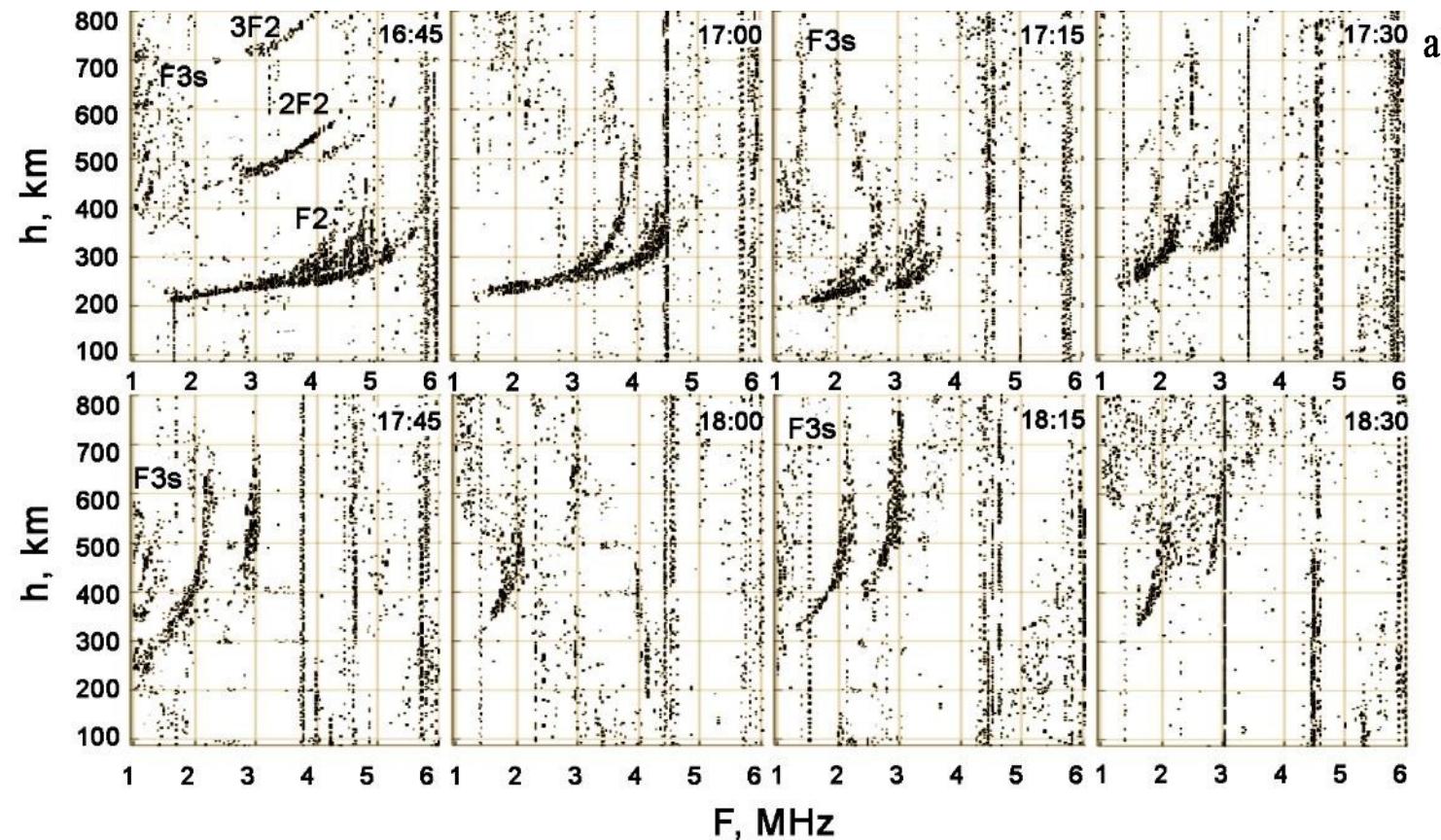
Гистограмма построена на основе результатов **34 зондирований**,
поскольку в **4 случаях** однозначно измерить время задержки не удалось.

Задержки эхо-сигналов находились в диапазоне **310 – 324 мс**,
Медианное значение составляло **316 мс**, среднеквадратичное
отклонение **2,8 мс**.



Фоновые условия эксперимента

Вертикальное зондирование ионосферы

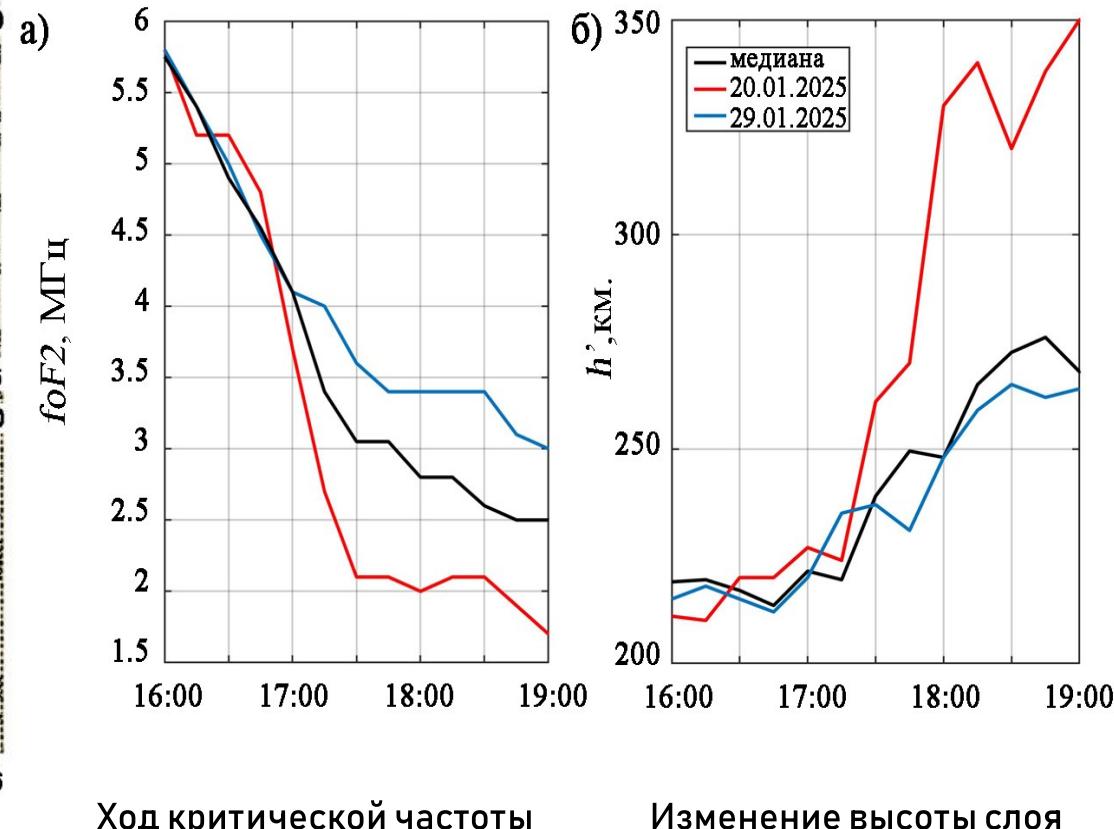


Ионограммы ВЗ на НИС «Горьковская»

Геомагнитная обстановка

$$Kp_{max} = 4+$$

$$\Sigma Kp = 27-$$



Ход критической частоты

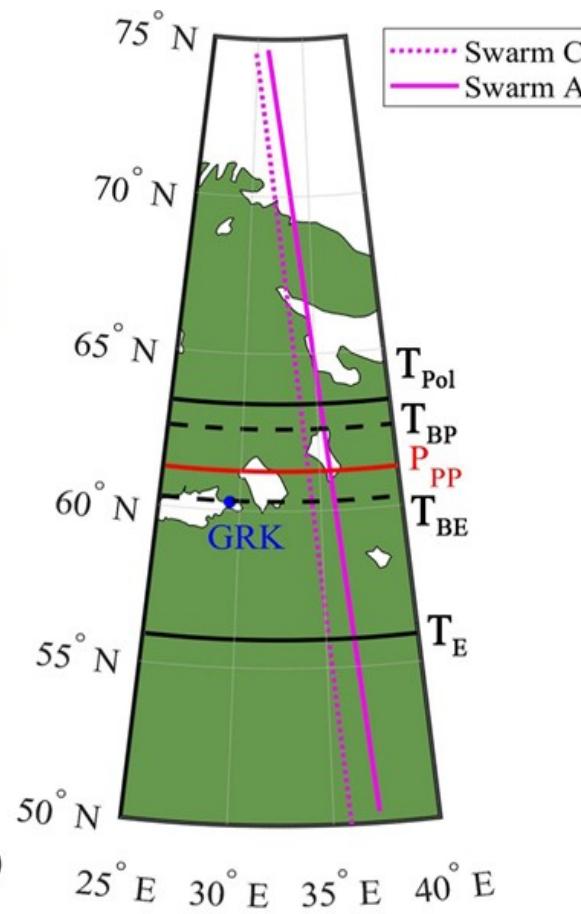
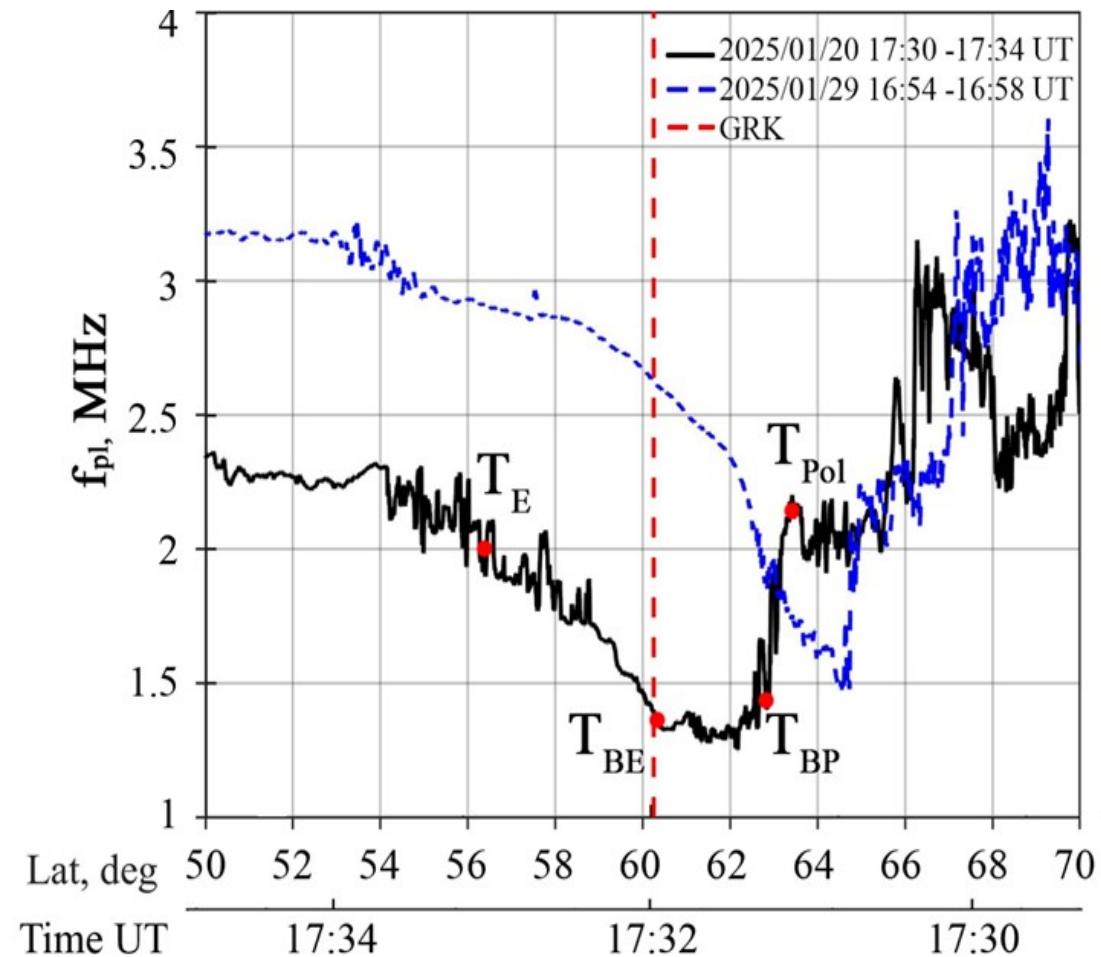
Изменение высоты слоя

Гидирование радиосигналов

Данные спутника

положение плазмопаузы

$$L_p = 5,6 - 0,46 K_{p_{max}}$$



a) Значения плазменных частот по данным спутника Swarm C в спокойных 29 января 2025г и возмущенных геомагнитных условиях 20 января 2025г.

b) Траектории спутников Swarm с 17:26 по 17:34 UT 20 января 2025 г

- ✓ экваториальная стенка провала (P_{pol}),
- ✓ экваториальная (P_{ME}) и полярная (P_{MP}) границы дна провала,
- ✓ северная стенка провала (P_{pol}),
- ✓ проекция плазмопаузы (P_{PP})

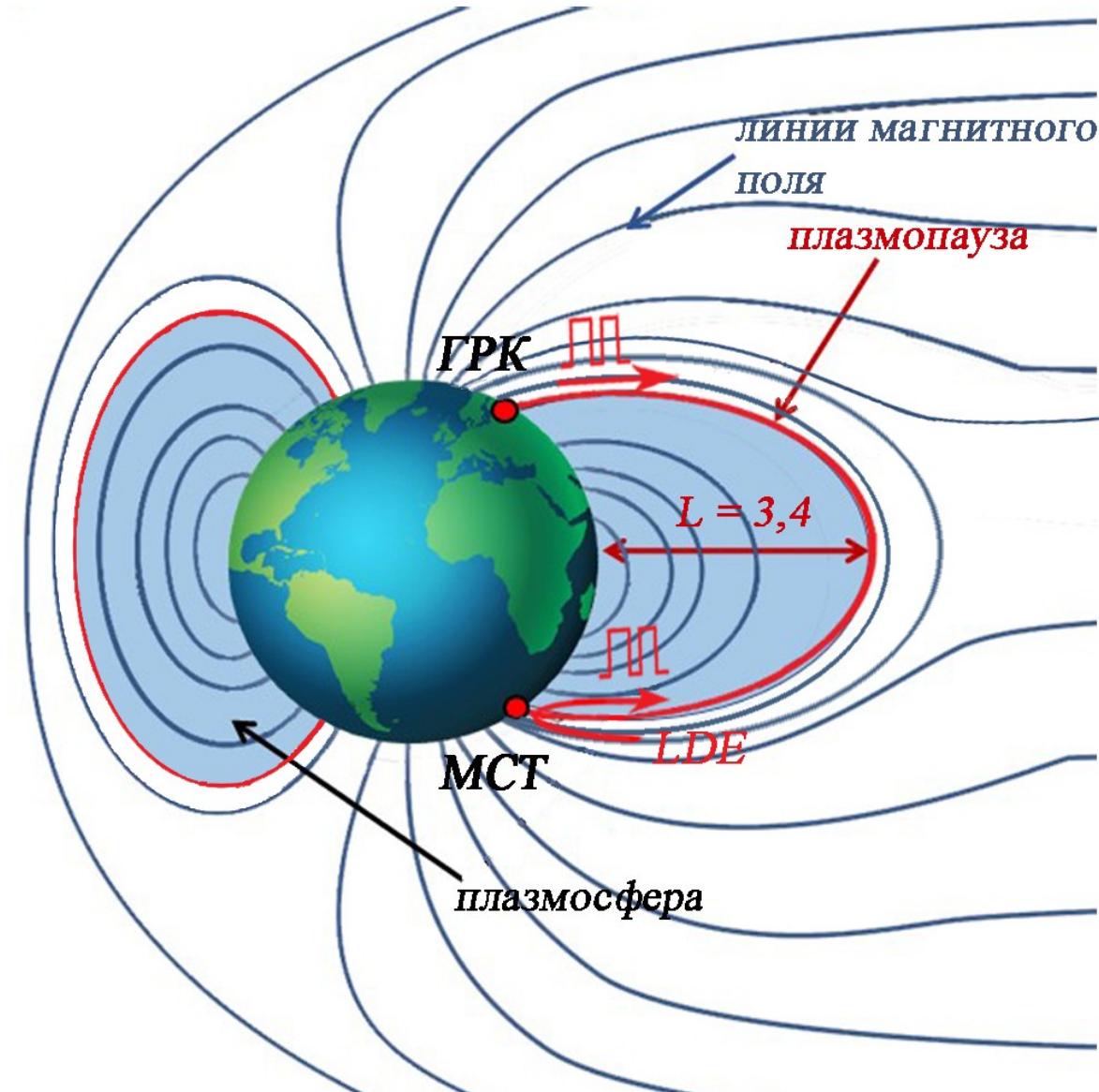
Обобщение результатов

- ✓ Экспериментально показан эффект гидирования средних радиоволн вдоль силовых линий магнитного поля
- ✓ Впервые эффект гидирования с поверхности Земли регистрировался в диапазоне частот, а не на одной фиксированной частоте. Эхо сигналы наблюдались от 2100 до 2400 кГц, с шагом 100 кГц
- ✓ Мощность излучения в экспериментах составляла 1 кВт, что также существенно ниже, чем в экспериментах, выполненных ранее

- ✓ Эффект гидирования наблюдался в вечернем секторе в районе 21 MLT в зимний период при возмущенных условиях.
- ✓ Частоты эхо-сигналов превышали критические частоты ионосферы в пункте излучения и были меньше критических частот в магнитосопряженной точке.

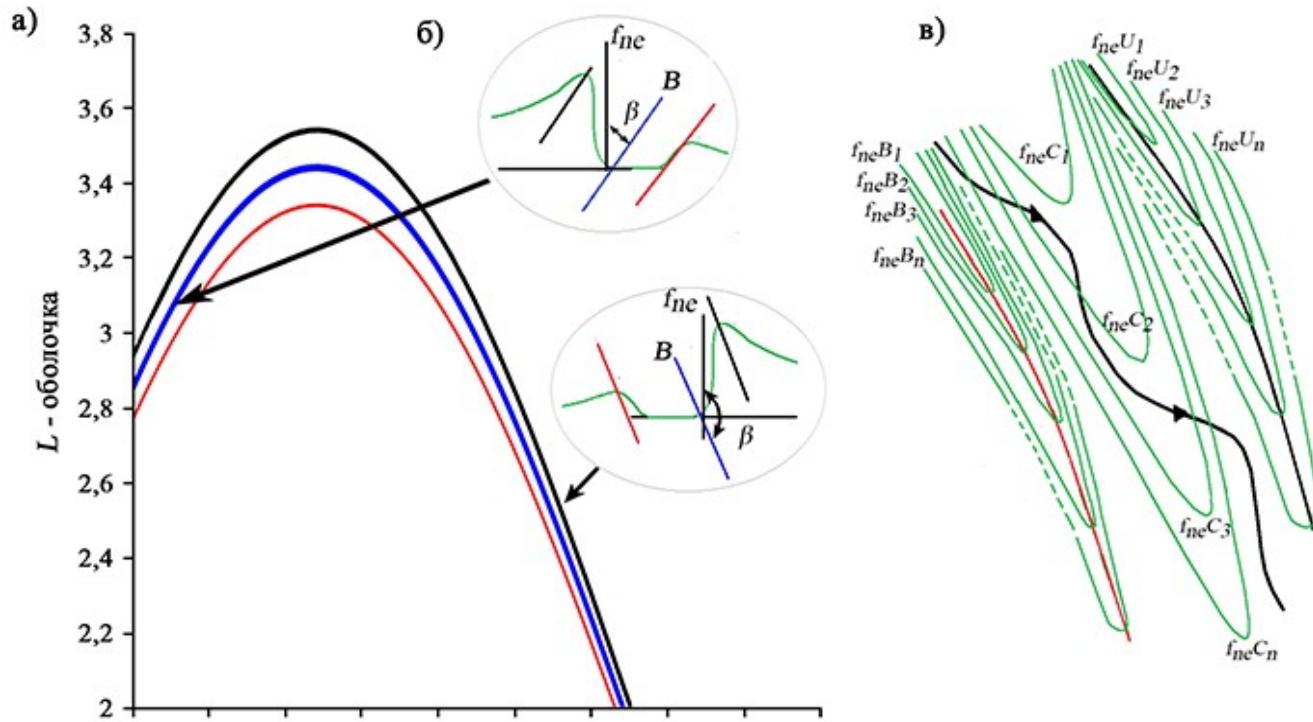
$$f_{oF2_{GRK}} < f_s < f_{oF2_{MCP}}$$

- ✓ Пункт излучения располагался на дне главного ионосферного провала, в зените наблюдался поляризационный джет.
- ✓ Гидирование радиоволн происходило на внешней границе плазмосферы вблизи плазмопаузы.

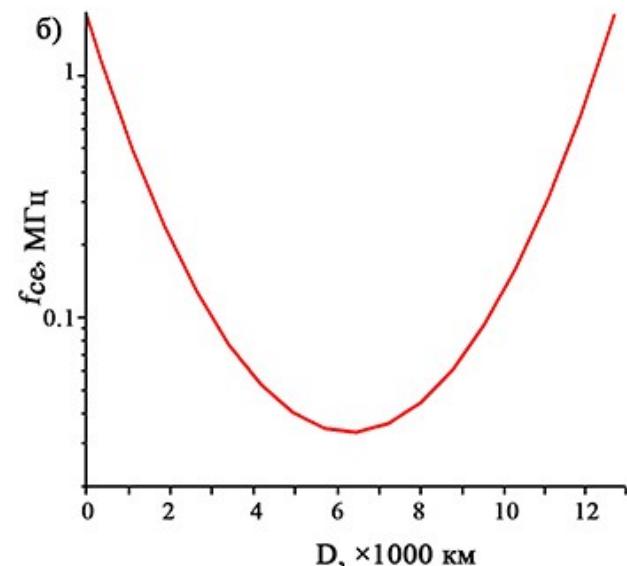
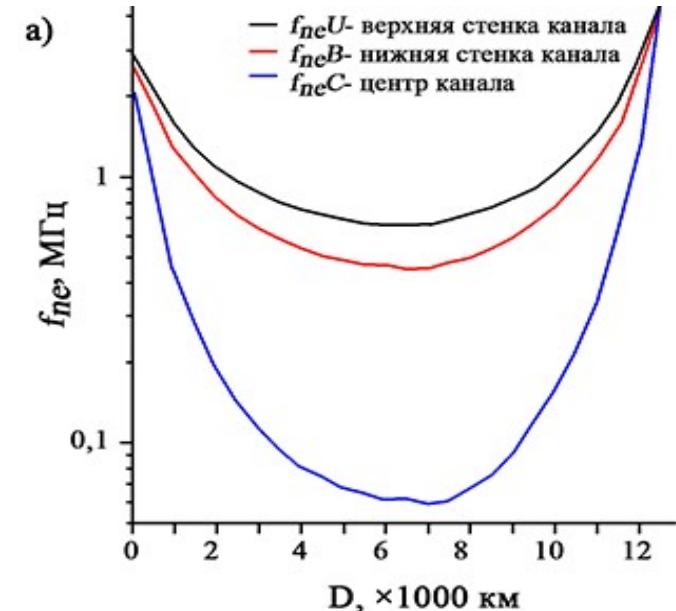


Результаты моделирования

Приближение геометрической оптики



Примерный вид ориентации силовых линий магнитного поля для границы ионосферно – магнитосферного канала ИМК (а), распределение электронной концентрации (плазменных частот f_{ne}) в поперечном разрезе магнитосферного канала (б), пример рассчитанной траектории радиоволны в ИМК и изолинии распределения электронной концентрации в центре ($f_{ne} C$), вдоль нижней ($f_{ne} B$) и верхней стенок ($f_{ne} U$) канала (в).



Распределение плазменных частот (а) и гирочастот (б) электронов в зависимости от дальности вдоль земной поверхности.